

# UBET の鍛造加工への応用に関する研究 IV ——中空円板・円管の傾斜工具による圧縮加工の解析——

Study on Application of UBET (Upper Bound Elemental Technique) to Forging IV  
——Analysis of Hollow Disk and Pipe Forging——

木 内 学\*・今 井 敏 博\*\*・鄭 顕 甲\*\*\*・柳 本 潤\*  
Manabu KIUCHI, Toshihiro IMAI, Hyun Kap CHUNG and Jun YANAGIMOTO

## 1. はじめに

筆者らは、UBET を用いた中空円板あるいは円管の圧縮加工に関する解析について、第 I 報<sup>1)</sup>および第 II 報<sup>2)</sup>において、ある範囲で十分妥当性のある解析が可能であること、また第 III 報<sup>3)</sup>において解析精度が向上したことについて報告した。しかし、前報までは平行平板による圧縮加工に限定されていたため、円管端部の拡張・縮管あるいはフレアリングといった傾斜工具による圧縮加工への適用は困難であった。そこでこの点を解決すべく、前報までに用いた速度場を拡張して、4 辺の自由な変形を許容できる要素を開発し、傾斜工具による圧縮加工への対応を可能にした。本報では、解析法の概略を示し、各種解析例や実験結果との比較、応用例等について報告する。今回、本解析法を用いて等相当ひずみ線の図化を試みたのであわせて報告する。

## 2. 解析手法

### 2-1 解析モデルと動的可容速度場

解析の対象となる円管（以下ワークと称す）を図 1 に示すごとく要素分割する。要素  $E_j$  内での動的可容速度場を (1)、(2) 式に示す。これは第 I 報、第 II 報で用いた準平行速度場をもとに、軸方向速度  $\dot{U}_y$  に半径  $r$  に関する成分（下線部）を付加したものである。

$$\dot{U}_r^{(j)} = (a_j r - A_j / r)y + b_j r - B_j / r + f_j r^2 + g_j \quad (1)$$

$$\dot{U}_y^{(j)} = -a_j y^2 - 2b_j y + c_j + d_j r + e_j r^2 - 3f_j r y - g_j y / r + h_j / r \quad (2)$$

ここで、 $a_j \sim h_j, A_j, B_j$  は未知係数である。この速度場が体積一定の条件を満たすことは明らかである。

### 2-2 解析モデルを構成する諸条件

1) 連続条件 要素間境界において相対すべりがなく、かつ変形後のプロフィールに段差が生じないために、連続

条件を設定する。本解析法では要素間境界が各軸に対し傾いているので、図 2 に示すごとく両節点を結ぶ直線 ( $y = ar + \beta$ ) を要素間境界とし、その直線上において

$$\dot{U}_r^{(j)} = \dot{U}_r^{(j-1)}, \dot{U}_y^{(j)} = \dot{U}_y^{(j-1)} \quad [y = ar + \beta] \quad (3)$$

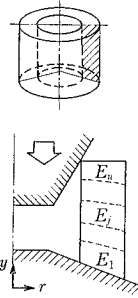


図 1 解析モデルと要素分割

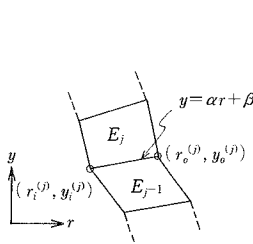


図 2 連続条件

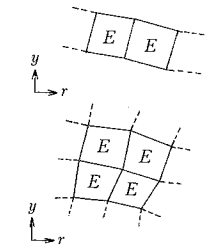


図 3 解析モデルの拡張

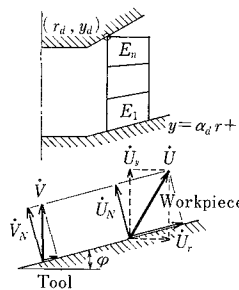


図 4 境界条件

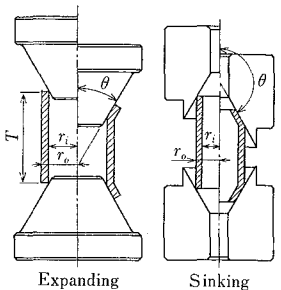


図 5 実験に用いた工具

\*東京大学生産技術研究所 第 2 部

\*\*日本電装㈱

\*\*\*韓国機械研究所

本報では要素が軸方向に並ぶ場合についてのみ検討したが、上記の方法は図3に示すごとく、要素が半径方向に並ぶ場合や、さらに  $r-y$  平面内の任意の配置に対し適用が可能である。

2) 境界条件 ワークと工具は節点あるいは要素辺で接触するので(図4)、境界条件を次のように設定する。

① 要素辺が工具に接触する場合 工具を表す直線を  $y = \alpha r + \beta a$  とすると、この直線上において

$$\begin{aligned} \dot{U}_N &= \dot{V}_N \\ \therefore \dot{U}_y \cdot \cos\varphi - \dot{U}_r \cdot \sin\varphi &= \dot{V} \cdot \cos\varphi \quad [y = \alpha r + \beta a] \end{aligned} \quad (4)$$

② 節点が工具に接触する場合 工具に接触する節点の座標を  $(r_a, y_a)$  とすると、この点において

$$\begin{aligned} \dot{U}_N &= \dot{V}_N \\ \therefore \dot{U}_y \cdot \cos\varphi - \dot{U}_r \cdot \sin\varphi &= \dot{V} \cdot \cos\varphi \quad [(r_a, y_a)] \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\dot{V}$  は工具速度、 $\dot{U}_N$ 、 $\dot{V}_N$  は面垂直方向の速度成分である。

ワーク全体の速度場を定めるためには、 $a_j \sim h_j$ ,  $A_j$ ,  $B_j$ , ( $j=1 \sim n$ ) の計  $10n$  個の未知係数を定める必要がある。上記の各条件から  $\{8(n-1)+4k+l\}$  個 ( $k$ : 要素辺接触の境界数,  $l$ : 節点接触の数) の条件式が得られる。したがって  $\{2n+8-4k-l\}$  個の未知係数が準独立変数となる。この準独立変数を仮定すれば、ワーク全体の速度場が定まり全仕事率を計算することができる。この準独立変数に関し全仕事率の最小化を図り速度場の最適化を行う。

表1 実験条件

	Workpiece/mm			Tool
	$r_i$	$r_o$	$T$	$\theta$
Expanding	16	20	50	30°, 60°
Sinking	10	13	50	150°

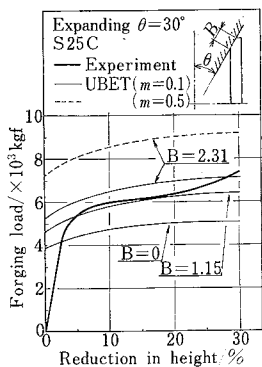


図6 圧下率-荷重線図 拡管( $\theta=30^\circ$ )

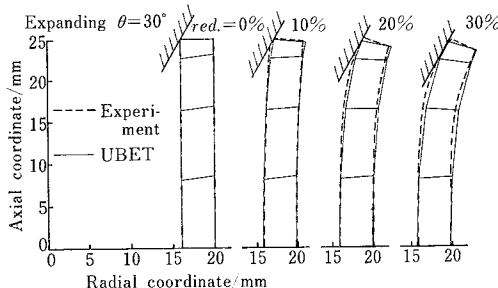


図7 ワークのプロフィール 拡管( $\theta=30^\circ$ )

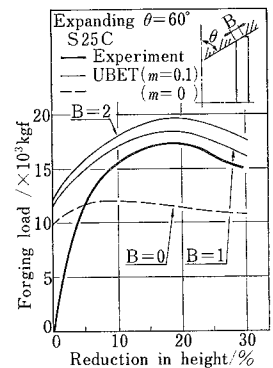


図8 圧下率-荷重線図 拡管( $\theta=60^\circ$ )

### 2-3 仕事率の算出

1)内部変形仕事率 2)摩擦損失 3)せん断仕事率 これらの算出方法については前報と同様であり本報では割愛する。

ワークの変形および相当ひずみは、最適化された速度場から節点の変位増分、積分点の相当ひずみ増分が予測できるので、これを累積して求める。この積分点での相当ひずみを用いて加工硬化を取り扱う。なお、等相当ひずみ線図は、この方法で求めた積分点および節点の相当ひずみの値より内挿して描いた。

### 3. 数値計算結果および実験との比較

本解析法の妥当性を確認するために、実験との比較を行った。

#### 3-1 計算および実験条件

図5に示す傾斜工具を用いて、円管端部の拡管および縮管実験を行い、UBETによる解析結果と比較した。素管寸法および工具傾斜角(以下 $\theta$ (半角)で表す)を表1に示す。素管材質はS25Cで、応力-ひずみ関係式は引張試験の結果より剛塑性近似した(6)式を用いた。工具と素管の間の潤滑はテフロンシートを用いた。

$$\bar{\sigma} = 35.0(1 + 50.0\varepsilon)^{0.228} \text{kgf/mm}^2 \quad (6)$$

なお、本報では素管初期高さに対する工具の移動距離の割合を圧下率(図中 red. で表す)とした。

#### 3-2 計算結果と実験結果の比較

1)拡管( $\theta=30^\circ$ )の場合 図6に圧下率-荷重線図を示す。B=0の実線は素管と同形のモデル(工具との接触幅B=0)による計算結果であるが、実測値より荷重を過小評価している。そこで、摩擦を考慮するため、あらかじめ接触幅を設けたモデルを用い、 $m=0.1$ を仮定した計算結果がB=1.15および2.31の実線で実測値に対し良い対応を示した。図7はワークのプロフィールを比較したもので、UBETでは要素が少ないので変形の曲率がやや小

研 究 速 報  
 さいがほぼ一致している。

2) 拡管 ( $\theta=60^\circ$ ) の場合 図 8 に 圧下率-荷重線図を示す。1) と同様に 工具との 接触幅を有するモデルを用いて 計算を行った場合、実測値と良く対応し、圧下率 20% 以上での 荷重の低下が、実験、計算共に認められた。UBET でこの様な現象 (くびれあるいは座屈) の解析が可能であることが確認できた。図 9 はワークのプロフィールを比較して示したもので、初期の段階 (圧下率 10%) において、実験では 工具接触部付近で 局所変形が進むのに対し、UBET では 全体的に変形が進む傾向が認められる。

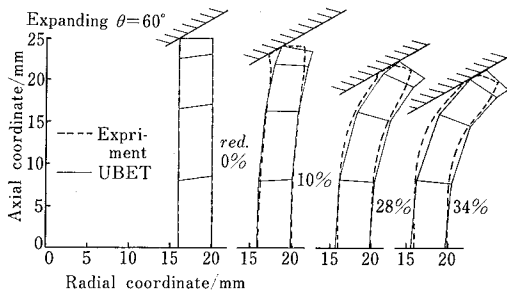


図 9 ワークのプロフィール 拡管 ( $\theta=60^\circ$ )

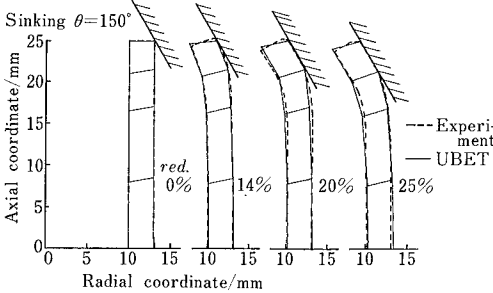


図 10 ワークのプロフィール 縮管 ( $\theta=150^\circ$ )

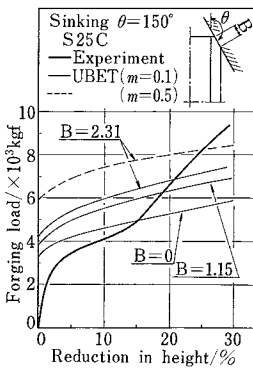


図 11 圧下率-荷重線図 縮管 ( $\theta=150^\circ$ )

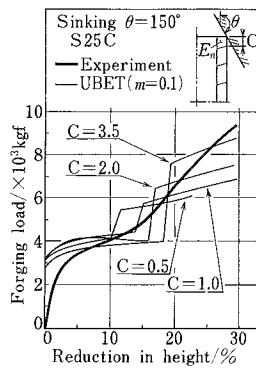


図 12 圧下率-荷重線図 縮管 ( $\theta=150^\circ$ )

3) 縮管 ( $\theta=150^\circ$ ) の場合 図 10 にワークのプロフィールを比較して示す。変形の曲率や端面の傾きに少し差が認められるものの、良い対応を示している。図 11 は 圧下率-荷重線図で、UBET による計算結果は 拡管の場合と同様に 工具との 摩擦を考慮して計算したものである。実測値が 圧下率 15% 付近から 急激に増加するのに対し、UBET では 対応できていない。これは UBET では 接触面積の増加が小さいのに対し、実際はそれが大きいためと考えられる。そこで、工具に接触している要素  $E_n$  の辺 (外周部) の初期長さ (=C) を変えて計算を行った。その結果を図 12 に示す。ここで用いたモデル ( $C=0.5 \sim 3.5$ ) はいずれも 圧下率 10%~20% の間で 要素  $E_n$  の辺が 工具と接触し、荷重の上昇が認められた。改善されているとはいえ、接触後の 荷重勾配は 実測値と合致しておらず、さらに細かい分割で 要素数の多いモデルを用いた解析が必要と考えられる。

4. 等相当ひずみ線図

本解析法は、最適化された速度場より求めた相当ひずみ速度を累積して、相当ひずみを求めている。今回、この値を用いて等相当ひずみ線の図化を試みた。その一例を図 13 に示す。これは前述の 拡管 ( $\theta=30^\circ$ ) の実験に対応するもので 圧下率 20%、30% である。同一モデルで 剛塑性有限要素法を用いて解析した結果を比較のために併

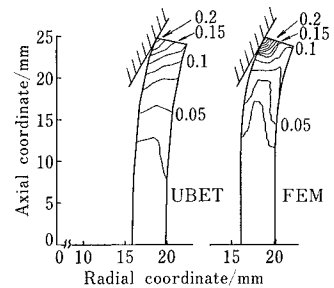


図 13(a) 等相当ひずみ線図 拡管 ( $\theta=30^\circ$ )  $\cdot$  red. = 20%

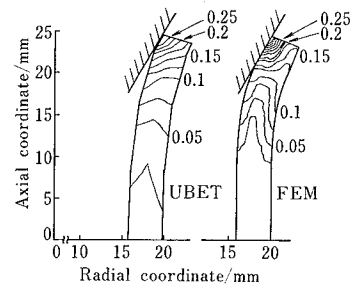


図 13(b) 等相当ひずみ線図 拡管 ( $\theta=30^\circ$ ) red. = 30%

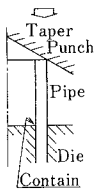


図 14 管端部の解析

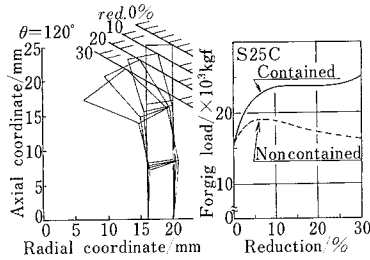


図 15 解析結果

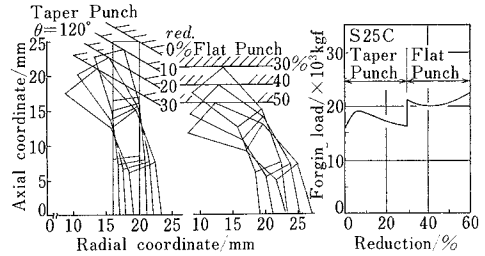


図 16 複数工程の解析・結果

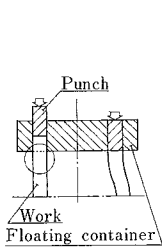


図 17 コントロール・フローすえ込み

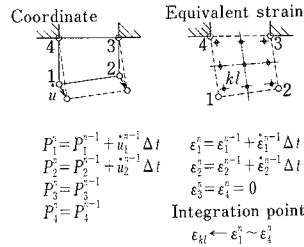


図 18 座標・相当ひずみの修正

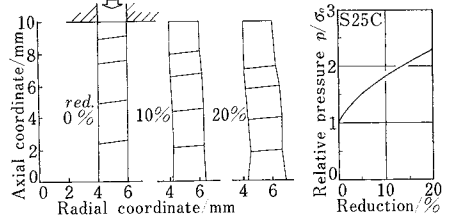


図 19 解析結果

記した。両解析法による結果は、若干位置のずれが認められるものの、値や分布は良く対応している。また UBET の結果は FEM の結果に比べ、相当ひずみの勾配が緩やかである。これは UBET では要素が少ないこともあるが、局部変形よりも全体的な変形が支配的になる傾向を持つためと考えられる。

5. 本解析法の応用

5-1 管端部の圧縮加工

以上の解析はすべて上下対称を仮定していたが、 $r$  軸上で半径方向の速度を拘束し管端部(図 14)の圧縮加工を想定した解析を行った。変形図および圧下率-荷重線図を図 15 に示す。

5-2 複数工程の解析

図 16 の変形図および圧下率-荷重線図は、圧下率 30% まで傾斜工具を用いて圧縮し、次に平行平板を用いてさらに圧縮(圧下率 50% まで)する連続した 2 つの工程を解析した結果である。

5-3 コントロール・フローすえ込みの解析

図 17 に示すパイプのコントロール・フローすえ込みの解析を行った。ここで用いた最上段の要素はステップご

とに体積の増加を許容できるもので、節点の座標や積分点の相当ひずみについて図 18 に示す修正を行う。この方法で計算した結果を図 19 に示す。

6. ま と め

本研究では前報までに用いた速度場を拡張して、4 辺の自由な変形が許容できる要素を開発し、円管の傾斜工具による圧縮加工の解析を試みた。本解析法を用いて計算した結果と実験や他の解析例と比較し妥当性の確認を行うとともに、本解析法の特徴について検討した。また等相当ひずみ線図を試作し、良好な結果を得た。さらに各種の実際問題への適用について検討を加えた。

(1986年3月29日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内・今井・鄭・柳本：第 36 回塑加工連講論 437
- 2) 木内・今井・鄭・柳本：第 36 回塑加工連講論 441
- 3) 木内・今井・鄭・柳本：昭 61 春塑加工連講論投稿中
- 4) 木内・村田・矢吹：塑性と加工 26, 290, (1985)
- 5) H. MATSUMOTO・S. I. OH・S. KOBAYASHI : Proc. 18th Int. MTDR Conf. 3
- 6) H. Kudo : Int. J. Mech. Sci., 2 (1960), 102